

Táňa HOLUŠOVÁ¹, Jan KLUSÁK², Stanislav SEITL³

VLIV VYBRANÝCH PARAMETRŮ NA PRŮBĚH PROTlačOVACÍ ZKOUŠKY

AN INFLUENCE OF SELECTED PARAMETERS ON PUSH-OUT TEST

Abstrakt

Spojení mezi betonem a ocelí bývá v konstrukcích často prováděno pomocí mechanických spojů, odolných proti usmýknutí. Tyto spoje však podléhají nežádoucím účinkům, jako je vysoká koncentrace napětí ve spojích nebo náchylnost ke korozi. Chceme-li se těmto negativním vlivům vyhnout nebo je zmírnit, je jedním z možných způsobů zvýšení adheze mezi betonem a ocelí použití epoxidového lepidla posypaného drobným štěrskem. V příspěvku je řešen vliv tloušťky mezivrstvy lepidla (epoxidu) použitého pro uvedené spojení oceli a betonu a pro samotné vystižení protlačovací zkoušky je provedena analýza změny parametru materiálového modelu cementového kompozitu. Numerický model a výpočet s a bez epoxidového spoje jsou provedeny ve 2D softwaru ATENA. Výsledky numerické studie jsou porovnány s experimentálně naměřenými daty.

Klíčová slova

Beton, ocel, protlačovací zkouška, epoxidové lepidlo.

Abstract

The connection between concrete and steel is often performed by mechanical connectors, which are resistant to shear. These connectors can be subjected to adverse effects, which are created by high stress concentration level in connectors or their tendency to corrosion. By using a bonded joint such as an epoxy layer gritted by granulates we can avoid or reduce these negative effects. In the contribution the influence of thickness of an adhesive epoxy interlayer used to connect steel plates and concrete is solved. For capturing push-out test the analysis of change of material model parameter of cement based composites is performed. The modeling is performed by 2D software ATENA with and without the epoxy layer. The results of the numerical study are compared with the experimental results.

Keywords

Concrete, steel, push-out test, epoxy adhesive.

1 ÚVOD

Ve stavebním průmyslu bylo využíváno mnoha různých druhů materiálů. V počátečním stádiu bylo využíváno zejména přírodních materiálů, jako je kámen nebo dřevo. V pokročilejší době byly tyto prvky opracovávány do úhlednějších podob a vyráběny nové keramické materiály. Posledních 150 let však bývá ke stavbám konstrukcí využíváno hlavně cementových kompozitů (betony klasické,

¹ Ing. Táňa Holušová, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, e-mail: holusova.t@fce.vutbr.cz.

² Ing. Jan Klusák, Ph.D., Ústav fyziky materiálů, Akademie věd České republiky, v. v. i., Žitkova 22, 616 62 Brno, e-mail: klusak@ipm.cz.

³ Ing. Stanislav Seitl, Ph.D., Ústav fyziky materiálů, Akademie věd České republiky, v. v. i., Žitkova 22, 616 62 Brno, e-mail: seitl@ipm.cz.

vysokopevnostní, aj.) a v neposlední řadě oceli. Tyto materiály se vyznačují svými výbornými vlastnostmi pevnosti, a to u betonů v tlaku a u oceli v tahu. Proto mezi hlavní proudy výzkumu patří analýza vzájemné interakce různých stavebních materiálů.

Pro posouzení vlastností materiálového rozhraní mezi betonem a ocelí se využívá protlačovací zkoušky, kdy jsou oba materiály k sobě spojeny zadanými způsoby a poté je na jeden z materiálů (v tomto případě beton) aplikováno zatížení (viz obr. 1 a 2). Poznamenejme, že ocel má v těchto kompozitních vzorcích vynikající ztužující vlastnosti. Spojení mezi betonem a ocelí bylo v minulosti řešeno různými způsoby, nejčastěji však pomocí ocelových mechanických konektorů. Například J-Hook spojení, jejichž analýzou se zabývali autoři Liew & Soheli v práci [9], nebo dlouhé hřeby odolné proti usmýknutí, jejichž možnosti použití a vlastnosti byly zkoumány v práci [10] autorů Nguyen & Kim.

Svarové spoje, jimiž jsou mechanické spoje převážně ukotveny na ocelovou část konstrukce, mohou podléhat nežádoucím efektům, jako je skoková změna materiálových parametrů (lomové houževnatosti, tažnosti atp.), snížení únavové odolnosti konstrukce, výskyt zbytkového napětí. Skoková změna materiálových parametrů spolu s tvarovými změnami (vruby) navíc vede v konstrukci k výskytu singulárních koncentrací napětí.

Jednou z možností, jak se vyhnout těmto negativním vlivům nebo je zmírnit, je vytvoření adhezního povrchu pomocí vrstvy epoxidového lepidla posypané jemnou šterkovou drtí, kterému se ve svých pracích věnovali například autoři Bouazaoui et al. [2] a Aboobucker et al. [1]. Numerickými simulacemi protlačovací zkoušky (push-out test) se zabývali autoři Klusák et al. [7] a [8]. S využitím zobecněné lomové mechaniky práce [7] modeluje singulární koncentrátor napětí pomocí bi-materiálového (ocel-beton) vrubu zatíženého kombinovaným namáháním, druhá práce [8] se zabývá studii vlivu přítomnosti materiálové mezivrstvy v numerickém modelu na hodnoty kritických zatěžovacích sil.

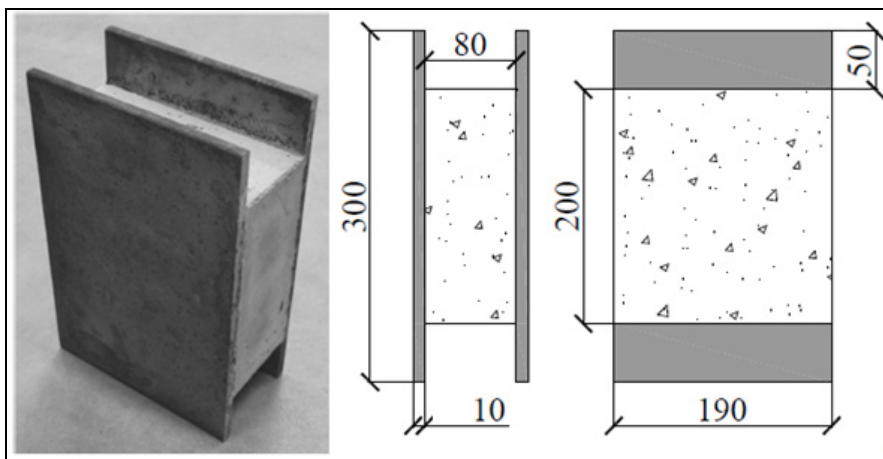
Cílem příspěvku je kvantifikovat vliv epoxidové mezivrstvy na chování zkušební tělesa při protlačovací zkoušce, viz obr. 2. Změnou parametru materiálového modelu cementového kompozitu vystihnout samotnou protlačovací zkoušku. Numerické studie budou provedeny v softwaru ATENA [3] (metoda konečných prvků). Příspěvek přímo navazuje na práce Helinckse et al. [4] a [5], kde jsou publikovaná data z experimentálního měření ze studované konfigurace protlačovací zkoušky.

2 PROTLAČOVACÍ ZKOUŠKA

Protlačovací zkouška (push-out test) byla využita jak pro experimentální získání smykových vlastností různých druhů spojení oceli a betonu [4], tak pro numerické studie [6], [7]. Na následujícím obrázku (obr. 1) je uveden tvar a rozměry zkušební tělesa použitého v [4] a [5].

Zkušební těleso se připraví následovně: na ocelových plátech tloušťky 10 mm je připraven adhezní povrch vytvořený pomocí vrstvy epoxidového lepidla posypané šterkovou drtí. Po vytvrzení mezivrstvy je vzorek dokončen nalitím samozhutňujícího betonu do formy. Pro mezivrstvu je využito dvousložkového epoxidového lepidla PC[®] 5800/PL, které má výbornou schopnost spojení s betonem a ocelí.

Vstupní materiálové parametry betonu (ve stáří 28 dnů, získané na válcových zkušebních tělesech dle NBN EN 12390-3, NBN EN 12390-6 a NBN B 15-203), oceli a epoxidového lepidla použité pro numerické simulace jsou uvedeny v tab. 1.



Obr. 1: Studované zkušební těleso pro protlačovací zkoušky s rozměry v mm (převzato z [4])

Tab. 1 Materiálové charakteristiky použité při numerických simulacích: beton, ocel a epoxid

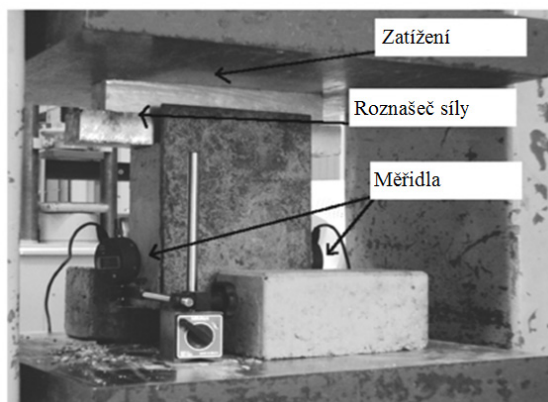
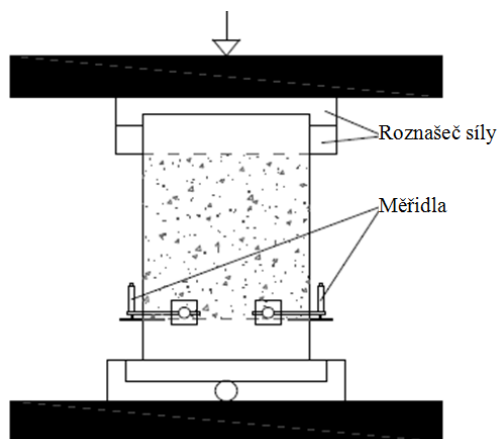
Materiálové parametry	Beton	Ocel	Epoxid
Youngův modul (E)	42,027 GPa	210 GPa	4,75 GPa
Poissonovo číslo (ν)	0,2	0,33	0,39
Pevnost v tahu	5,16 MPa		
Pevnost v tlaku	58,9 MPa		

2.1 Protlačovací zkouška - experiment

V rámci spolupráce s University College Ghent byla připravena a odzkoušena tělesa pro protlačovací zkoušku, podrobnosti viz [4]. Byla testována celkem čtyři zkušební tělesa s označením P10-1 až P10-4. Experimentálně změřené hodnoty kritických sil jsou pak uvedeny v tab. 2. Konfigurace pro provedení zkoušky je uvedena na obr. 2.

Experimentální měření:

- 1) Experiment se provádí na servohydraulickém stroji s řízeným posuvem a se záznamem průběhu síly.
- 2) Na ocelových plátech jsou připojeny dva měřící brity pro měření vzájemného posuvu mezi betonem a ocelí.
- 3) Na betonové těleso připevněné mezi pláty působí zatížení posuvem, viz obr. 2.



Obr. 2: Konfigurace protlačovací zkoušky (převzato a přeloženo názvy z Helincks et al. [4])

Tab. 2 Velikosti kritické síly pro jednotlivé zkušební vzorky získané při experimentálních měřeních, převzato z Helincks et al. [4]

Číslo testovaného vzorku	Kritická síla [kN]
P10-1	320,97
P10-2	291,60
P10-3	261,51
P10-4	296,89

2.2 Protlačovací zkouška – numerická studie

Numerická studie protlačovací zkoušky byla provedena v programu ATENA 2D (MKP, Červenka Consulting [3]). Ve studii, která je uvedena v příspěvku Holušová & Seidl [6] bylo provedeno srovnání mezi výsledky získanými výpočtem na modelu symetrické poloviny a modelem celého zkušebního tělesa s důrazem na okrajové podmínky.

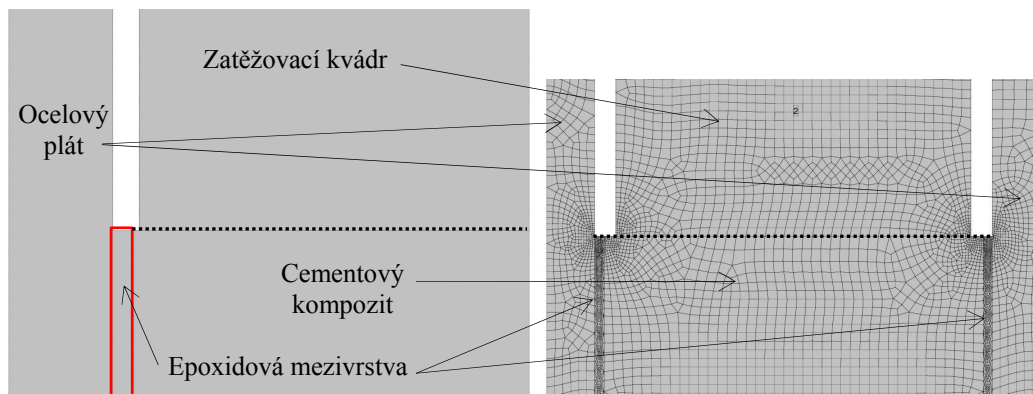
V této práci je pro numerické simulace použit model celého tělesa. Pro parametrickou studii bylo využito dvou úhlů pohledu na umístění epoxidové mezivrstvy:

- První uvažuje s nahrazením krajních pásů betonové části v tloušťkách 0,5; 1,0; 1,5 a 2,0 mm směrem k zatěžovacímu kvádru. Vzdálenost ocelových plátů tak zůstává stejná, tedy 80 mm, viz obr. 1.
- Druhý pohled uvažuje s postupným zvětšováním vzdálenosti mezi ocelovými pláty (vzdálenost > 80 mm), při zachování šířky betonové části (80 mm). Mezi betonovou a ocelovou část se pak vloží vrstva epoxidového lepidla v tloušťkách shodných s prvním případem.

Pro modelování betonové části byl použit materiálový model nazvaný v ATENA - 3D Nonlinear cementitious 2 s krychelnou pevností $f_c = 58,9$ MPa. Zadaná krychelná pevnost odpovídá naměřené pevnosti betonové směsi využitě při experimentálně provedené zkoušce protlačení, uveřejněné v článku Helincks et al [4]. Pro modelování ocelových plátů byl použit model Pružný – rovinná deformace, s využitím modulu pružnosti (E) a Poissonova čísla (ν), viz tab. 1 a objemovou hmotností oceli $\rho = 7850$ kg/m³. Tloušťka tělesa je 190 mm (viz obr. 1), proto byly všechny 2D úlohy modelovány s využitím podmínky rovinné deformace.

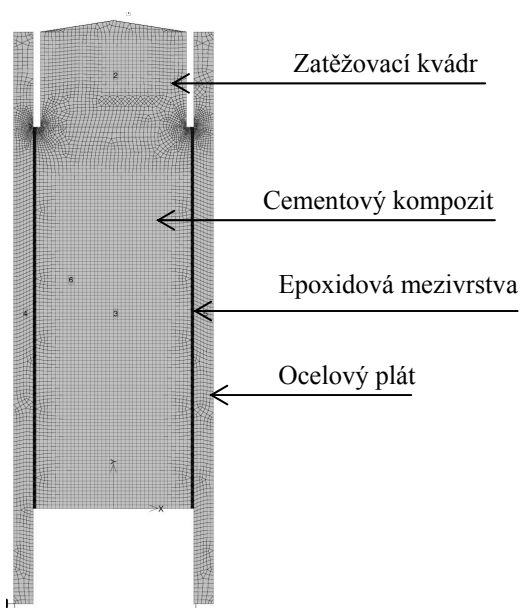
Studie vlivu kvality sítě konečných prvků bez uvažování epoxidové mezivrstvy byla provedena v práci autorů Holušová & Seidl [6]. Z numerické studie vlivu velikosti konečného prvku na průběh zatěžovací zkoušky [6] bylo vyhodnoceno, že neadekvátnější základní velikost konečného prvku je o délce strany 2 mm při čtyřúhelníkové síti konečných prvků. Pro výpočet bylo dále uplatněno zhuštění této sítě v okolí bi-materiálového rozhraní (ocel-epoxid-beton) na velikost strany elementu 0,2 mm. Stejnou sítí konečných prvků (0,2 mm) byl pokryt i úzký pruh epoxidové mezivrstvy.

Tento příspěvek je věnován studii vlivu tloušťky epoxidové mezivrstvy na velikost maximální zatěžovací síly. Tloušťka epoxidové mezivrstvy byla v modelu postupně měněna a to od 0; 0,5; 1,0; 1,5 a 2,0 mm (viz obr. 3), což pokrývá předpokládané spektrum běžně aplikované mezivrstvy. V okolí předpokládaného růstu trhliny byla použita síť zjemněna. Vstupní materiálové parametry epoxidové mezivrstvy do software ATENA 2D byly Yongův modul (E) a Poissonovo číslo (ν), a jsou uvedeny v tab. 1. Mezivrstva je uvažovaná jako dokonale rozložená po celé hloubce tělesa a tedy opět jako u ocelových plátů je aplikován při 2D výpočtu stav rovinné deformace (model Pružný – rovinná deformace).



Obr. 3: Modely zkušebních těles, s popsanými částmi a použitou sítí konečných prvků

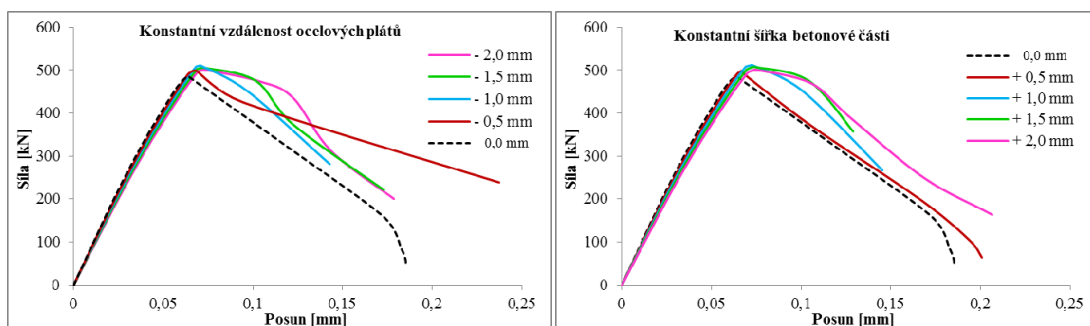
Celkový pohled na výpočtový model s aplikovanými okrajovými podmínkami je uveden na obr. 4. Okrajové podmínky odpovídají realitě, zatížení je rozloženo přes zatěžovací kvádr. Zatížení se aplikuje předepsaným posuvem se zatěžovacím krokem 0,005 mm.



Obr. 4: Celkový pohled na model zkušební tělesa, aplikované okrajové podmínky

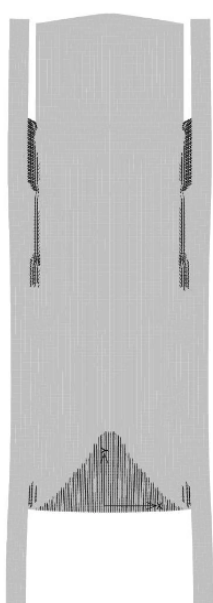
3 NUMERICKÉ VÝSLEDKY A DISKUSE

Numerické výsledky byly získány pro následující epoxidové šířky mezivrstev: 0 (bez epoxidové mezivrstvy); 0,5; 1,0; 1,5 a 2,0 mm. Jednotlivá bi-materiálová rozhraní (ocel-beton, ocel-epoxid, epoxid-beton) mezi jednotlivými materiály jsou modelována jako ostrá (skoková změna mechanických vlastností) a s dokonalou adhezí.



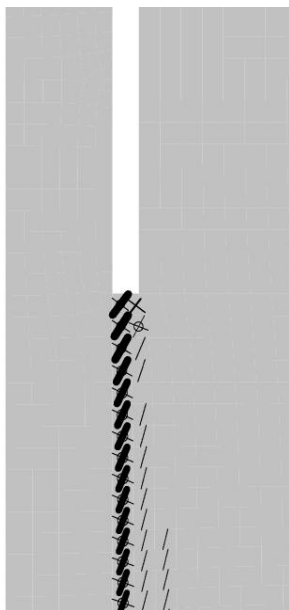
Obr. 5: Celkové zatěžovací diagramy

Celkový přehled výsledků numerické studie (zatěžovací diagramy pro jednotlivé tloušťky epoxidové mezivrstvy) je uveden v grafech na obr. 5. Výsledky jsou vykresleny jako diagramy síla versus posunutí na středu spodního líce cementového kompozitu. Výchozí numerický výsledek výpočtu bez uvažování epoxidového lepidla (přímo rozhraní ocel-beton) je v grafu zobrazen černou čárkovanou křivkou. Analogicky jako jsou zaznamenávány diagramy síla versus posun při experimentálních měřeních zatěžovacích zkoušek [4], [5]. V grafu, který je umístěn vlevo na obr. 5, jsou uvedeny průběhy křivek pro případ, kdy se ponechávala konstantní vzdálenost ocelových plátů a epoxidová vrstva nahrazovala krajní pásy betonové části. V grafu, který je umístěn vpravo, jsou vyneseny zatěžovací křivky pro druhý případ – kdy zůstává konstantní šířka betonového prvku.



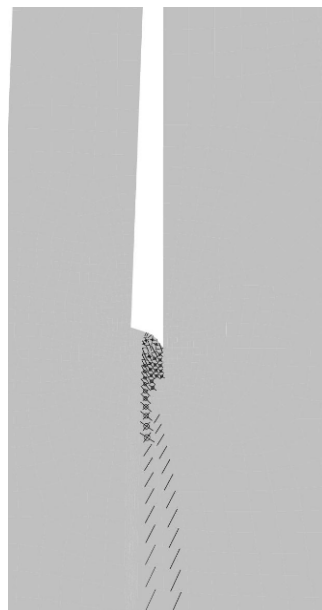
a)

Příklad – celkový pohled na push-out test po numerické simulaci



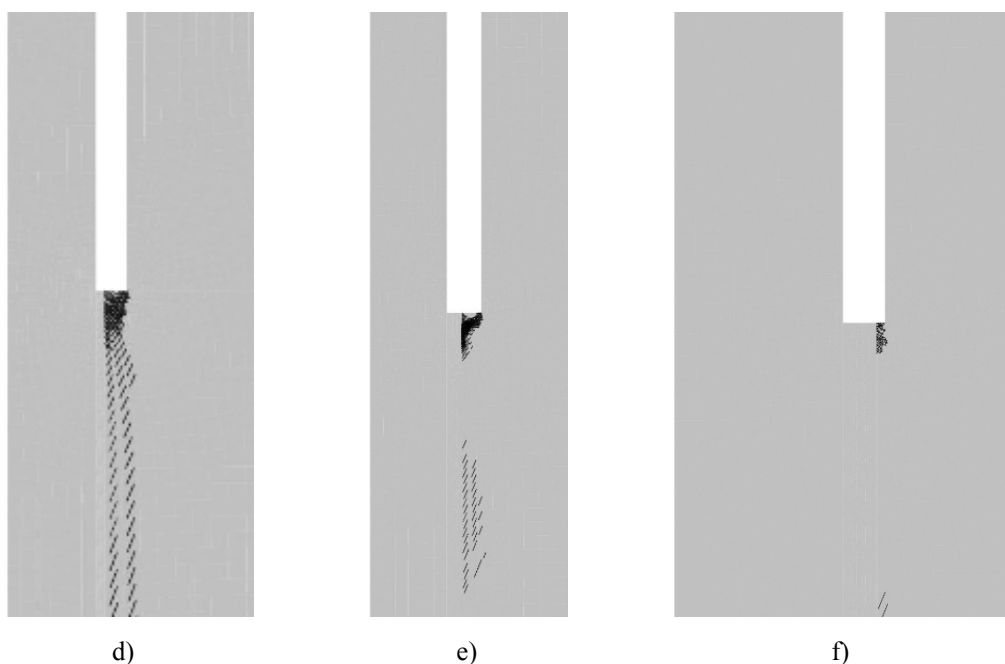
b)

Detail – bez epoxidové mezivrstvy



c)

Detail – epoxidová mezivrstva v šířce 1 mm – případ č. 1



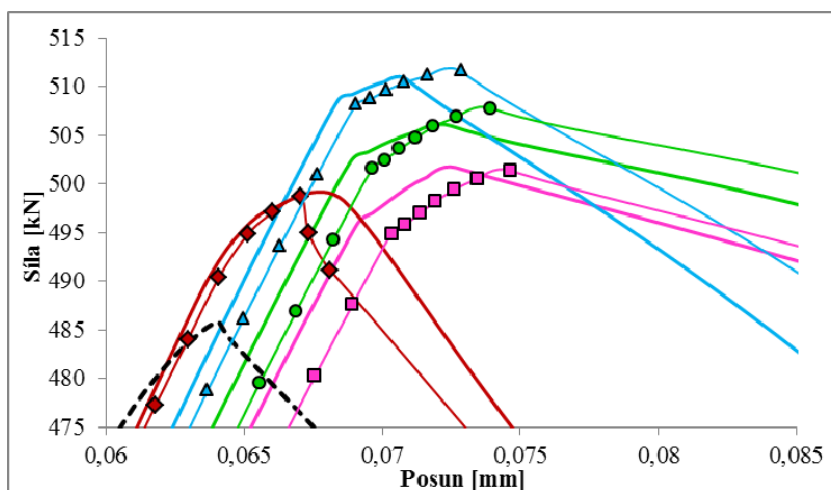
d)
Detail – epoxidová
mezivrstva v šířce 1 mm –
případ č. 2

e)
Detail – epoxidová mezivrstva
v šířce 2 mm – případ č. 1

f)
Detail – epoxidová mezivrstva
v šířce 2 mm – případ č. 2

Obr. 6: Vybrané obrázky smykových [a)-f)] a tahových [a)] trhlin z numerických simulací

Poznamenejme, že k iniciaci trhliny dochází tam, kde existují největší napětí: i) smyková napětí – v blízkosti rozhraní cementového kompozitu a mezivrstvy, nebo ii) tahová napětí – na spodní části betonového prvku, viz obr. 6 a). Trhliny se vždy iniciují do betonové části zkušebního tělesa. Při numerických simulacích se ukázalo, že dominantní pro vznik trhliny je dosažení maxima smykového napětí v blízkosti rozhraní. Na obr. 6 b)-f) jsou vyneseny detaily smykových trhlin při maximálním zatížení. Na obrázcích je vidět, že se trhlina iniciuje v blízkosti rozhraní do betonové části.



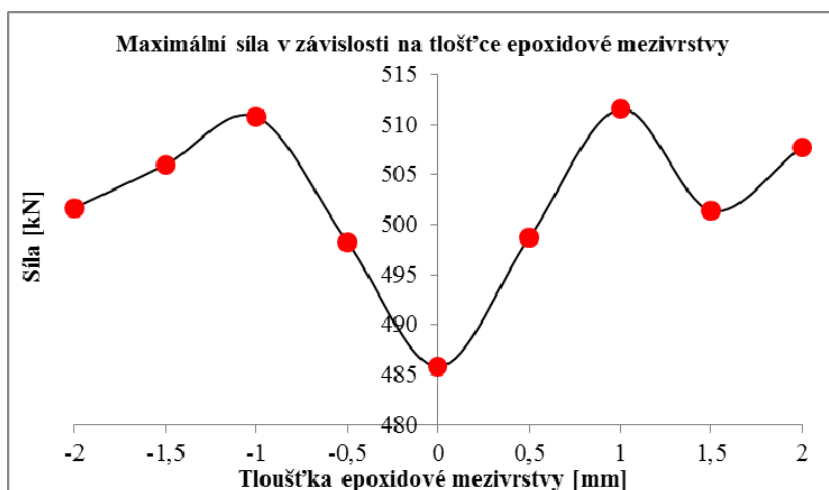
Obr. 7: Detail zatěžovacího diagramu v blízkosti dosažení maximálních sil

Na obr. 7 je uveden detail průběhu zatěžovacího diagramu v blízkosti vrcholu zatěžovacích sil. Barevné označení zatěžovacích křivek je převzato s obr. 5, přičemž křivky s označením odpovídají případu č. 2, kdy zůstávala šířka betonové části konstantní a zvětšovala se vzdálenost mezi ocelovými pláty. Z grafu plyne, že samotná existence epoxidové mezivrstvy vždy znamená nárůst potřebné maximální síly.

Pro lepší kvantifikaci jsou v grafu na obr. 8 vyneseny maximální zatěžovací síly v závislosti na tloušťce epoxidové mezivrstvy.

- 1) Hodnoty na vodorovné ose označené znaménkem minus (-) označují modely, kdy zůstávala vzdálenost ocelových plátů konstantní – případ č. 1.
- 2) Hodnoty na kladné poloose označují variantu modelu, kdy zůstávala šířka betonové části konstantní – případ č. 2.

Z grafu na obr. 8 je patrné, že k nárůstu potřebné maximální síly dochází v rozmezí 3 až 5 %, což nepřekračuje výrazně nepřesnost řešení. Poměrně nízký nárůst maximální síly může být způsoben iniciací trhliny do betonové části (tedy potřebné smykové napětí k vyvolání magistrální trhliny je ve všech sledovaných případech stejné). Při uvažování větší šířky epoxidové mezivrstvy ($t > 1$ mm) následně dochází k mírnému poklesu maximální síly nikoli však pod maximální sílu, která je vypočtena bez uvažování mezivrstvy.



Obr. 8: Maximální zatěžovací síly v závislosti na tloušťce epoxidové mezivrstvy. Hodnoty na vodorovné ose označené znaménkem minus (-) označují modely, kdy zůstávala vzdálenost ocelových plátů konstantní

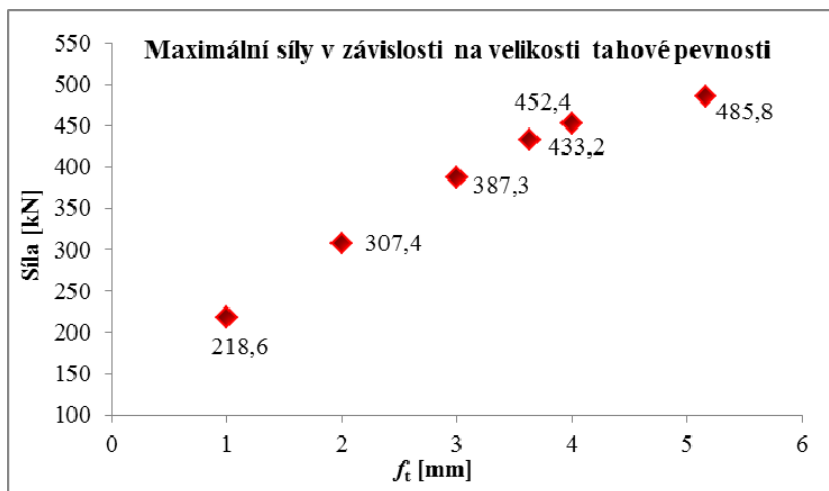
4 SROVNÁNÍ NUMERICKÝCH VÝSLEDKŮ S EXPERIMENTEM

Experimentálně získané hodnoty maximálních sil jsou uvedeny v tab. 2. Při porovnání jednotlivých numericky získaných hodnot (min okolo 485 až max. 515 kN) a experimentálně zjištěných (max. 320 kN) je vidět, že ve všech studovaných případech jsou hodnoty maximální síly vždy výrazně vyšší než reálně získané hodnoty z experimentu. Numericky získané hodnoty mají odchylku do 5 %, což odpovídá chybě při numerickém výpočtu. Lze tedy vyslovit doporučení, že v případě numerických výpočtů pro danou konfiguraci není třeba mezivrstvu při modelování uvažovat.

Vstupní parametry pro betonovou část protlačovací zkoušky byly vloženy do výpočtu na základě experimentálních dat provedených dle NBN EN 12390-3, NBN EN 12390-6 a NBN B 15-203 na válcových tělesech, odlitých z válcové formy, viz kapitola 0. Příprava zkušebního tělesa pro protlačovací zkoušku probíhá technologicky jiným způsobem (viz kapitola 0). Proto lze vyslovit předpoklad, že v důsledku výroby experimentálních zkušebních těles může v betonové části

konfigurace protlačovací zkoušky dojit vlivem smršťování a dotvarování k redistribuci vnitřního napětí. Tím může dojít k přecenění tahových vlastností betonové části tělesa a tedy i k výraznému navýšení maximálních zatěžovacích sil v numerické studii oproti experimentu.

Proto byla provedena inverzní analýza parametru tahové pevnosti na numerických modelech bez uvažování mezivrstvy, který je podle experimentu i v numerické studii uvažován hodnotou $f_t = 5,16$ MPa (viz tab. 1). Pro inverzní analýzu pak byly vybrány následující hodnoty tahové pevnosti 1,0; 2,0; 3,0; 3,633 a 4,0 MPa a postupně zadávanými jako vstupní parametr v materiálovém modelu cementového kompozitu 3D Nonlinear cementitious 2.



Obr. 9: Maximální zatěžovací síly v závislosti na velikosti tahové pevnosti

Dosažené numerické výsledky jsou uvedeny v grafu na obr. 9, kde jsou vyneseny maximální síly v závislosti na velikosti zadané tahové pevnosti. Analýzou bylo zjištěno, že odpovídající pevnost v tahu betonu tak, aby numericky zjištěná data odpovídala experimentálnímu měření, se pohybuje okolo 2 MPa, což je cca 40 % oproti původně zjištěné hodnotě 5,16 MPa.

5 ZÁVĚR

V příspěvku byla provedena numerická studie vlivu tloušťky mezivrstvy a změny parametru tahové pevnosti na hodnotu maximální síly při modelování protlačovací zkoušky (angl. push-out test).

Na vytvořených modelech zkušebních těles v software ATENA byly provedeny odpovídající výpočty metodou konečných prvků s využitím modelu kohezivní trhliny.

Z provedené numerické analýzy plyne:

- 1) Uvažováním epoxidové mezivrstvy se výrazně nezlepší popis chování zkoušky a lze ji tedy při numerických simulacích zanedbat.
- 2) Změnou parametru materiálového modelu cementového kompozitu lze vystihnout experimentálně provedeného protlačovacího testu.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finanční podpory Grantové agentury České republiky č. P104/11/0833 a č. P108/10/2049 a juniorského specifického výzkumu VUT č. FAST-J-12-3.

LITERATURA

- [1] ABOOBUCKER, M. A. M., WANG, T. Y., RICHARD LIEW, J. Y. An experimental investigation on shear bond strength between steel and fresh cast concrete using epoxy. The

IES Journal Part A: *Civil & Structural Engineering* Vol. 2, (No. 2), 2009, pp. 107-115, ISSN: 1937-3260.

- [2] BOUAZAOUI, L., PERRENOT, G., DELMAS, Y., LI A. Experimental study of bonded steel concrete composite structures. *Journal of Constructional Steel Research* 63, 2007, pp. 1268-1278, ISSN: 0143-974X.
- [3] Červenka consulting, s.r.o. – www.cervenka.cz.
- [4] HELINCKS, P., DE CORTE, W., KLUSÁK, J., SEITL, S., BOEL, V., DE SCHUTTER, G. Failure conditions from push-out tests of a steel-concrete joint: Experimental results. *Key Engineering Materials*, Vols. 488-489, 2012, pp. 714-717, ISSN: 1013-9826.
- [5] HELINCKS, P., DE CORTE, W., KLUSÁK, J., SEITL, S., BOEL, V., DE SCHUTTER, G. Experimental investigation of the influence of the bond conditions on the shear bond strength between steel and self-compacting concrete using push-out tests, *Key Engineering Materials*, Vols. 525-526, 2013, pp. 81-84, ISSN: 1013-9826.
- [6] HOLUŠOVÁ, T., SEITL, S. Numerická studie vlivu kvality MKP sítě v okolí bi-materiálového rozhraní na průběh zatěžovací síly: Push-out test. *Modelování v mechanice* (CD), 2012, pp. 1-7, ISBN 978-80-248-2694-3.
- [7] KLUSÁK, J., SEITL, S., DE CORTE, W., HELINCKS, P., BOEL, V., DE SCHUTTER, G. Failure conditions from push out tests of a steel-concrete joint: Fracture mechanics approach, *Key Engineering Materials*, Vols. 488-489, 2012, pp. 710-713, ISSN: 1013-9826.
- [8] KLUSÁK, J., HELINCKS, P., SEITL, S., DE CORTE, W., BOEL, V., DE SCHUTTER, G. The influence of the epoxy interlayer on the assessment of failure conditions of push-out test specimens, *Key Engineering Materials*, Vols. 525-526, 2013, pp. 61-64, ISSN: 1013-9826.
- [9] LIEW, R. J. Y., SOHEL, K. M. A. Lightweight steel-concrete-steel sandwich system with J-hook connectors, *Engineering Structures* 31, 2009, pp. 1166-1178, ISSN: 0141-0296.
- [10] NGUYEN, H.T., KIM, S., E. Finite element modeling of push-out tests for large stud shears connectors, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65 (10-11), 2009, pp. 1909-1920, ISSN: 0143-974X.

Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Radomír Pukl CSc., Červenka Consulting s.r.o., Praha.

Doc. Ing. Brožovský Jiří, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-TU Ostrava.